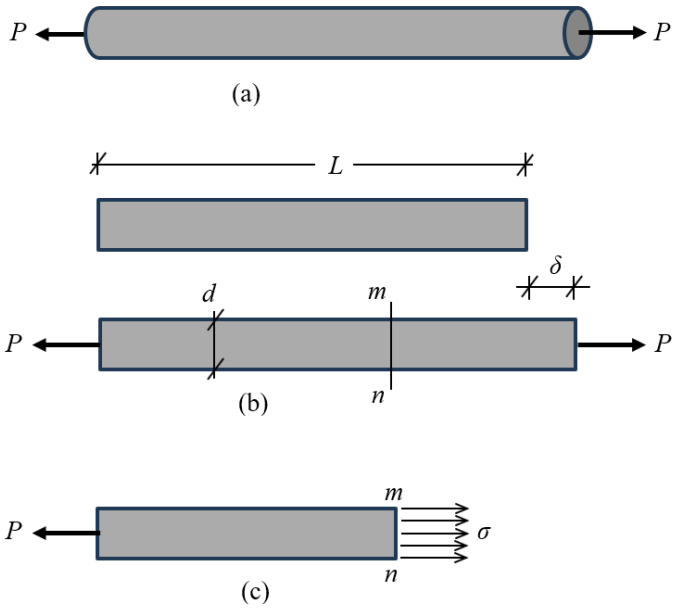
BAB 11. REGANGAN

Dr. Ir. Muslikh, M.Sc., M.Phil., IPM.
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

11.1 Regangan Normal

Suatu batang prismatis sepanjang L yang dibebani gaya aksial P akan bertambah panjang jika gayanya berupa gaya tarik, dan akan memendek jika gayanya berupa gaya tekan, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.1.a. Perubahan panjang yang terjadi, yang dinyatakan dengan huruf Yunani δ (delta), digambarkan pada Gambar 11.1.b untuk batang yang tertarik. Perpanjangan yang terjadi merupakan akumulasi peregangan seluruh elemen material sepanjang batang L.



Gambar 11.1 Batang prismatis yang dibebani gaya aksial tarik

Jika material dianggap sama untuk seluruh batang, maka jika kita hanya memandang untuk setengah batang, maka besarnya perpanjangan adalah $\delta/2$, demikian pula jika kita memandang 1

unit panjang batang, maka besarnya perpanjangan adalah $1/L$ dikalikan dengan perpanjangan total δ. Dari sini muncul konsep perpanjangan per unit panjang, atau **regangan** (*strain*), yang dinyatakan dengan huruf Yunani ε (epsilon), dan dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11\text{-}1)$$

Pada batang yang mengalami gaya tarik, regangan yang terjadi disebut regangan tarik, yang menunjukkan perpanjangan atau peregangan materialnya. Jika batang mengalami gaya tekan, maka regangan yang terjadi berupa regangan tekan dan batang mengalami perpendekan. Regangan tarik biasanya dinyatakan sebagai positif, dan regangan tekan dinyatakan sebagai negatif. Regangan ε disebut regangan normal, karena berkaitan dengan tegangan normal, yang bekerja tegak lurus pada penampang batang.

Karena regangan normal ε adalah rasio dari buah panjang, maka regangan normal ini merupakan besaran tanpa dimensi, sehingga tanpa satuan. Dengan demikian regangan dinyatakan sebagai suatu angka murni, yang tidak bergantung kepada sistem satuan manapun.

Nilai numerik regangan biasanya sangat kecil, khususnya untuk material struktur, yang hanya mengalami perubahan kecil dalam dimensi. Sebagai contoh, kita pandang batang baja dengan panjang L sebesar 2,0 m. Ketika dibebani tarik, batang baja akan memanjang dengan δ sebesar 1,4 mm. Besarnya regangan adalah

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{1{,}4 \times 10^{-3}\, m}{2{,}0\, m} = 0.0007 = 700 \times 10^{-6}$$

Pada batang yang prismatis dengan material yang homogen, dan beban yang bekerja melalui pusat berat penampang, maka regangan yang terjadi disebut **regangan uniaksial** (*uniaxial strain*).

Gaya aksial tarik *P* yang bekerja pada ujung batang (Gambar 11.a) akan menimbulkan tegangan internal pada **tampang potongan** (*cross section*) *m-n* pada Gambar 11.b. Besarnya intensitas gaya, yaitu gaya per satuan luas, disebut **tegangan** (*stress*), yang umumnya dinyatakan dengan huruf Yunani σ (sigma). Jika dianggap tegangan terdistribusi merata pada tampang potongan, maka besarnya tegangan dapat dinyatakan sebagai hasil pembagian gaya *F* oleh luas tampang potongan *A* berikut ini

$$\sigma=\frac{P}{A} \quad \text{.....} \quad (11\text{-}2)$$

Jika batang mengalami gaya aksial tarik *F*, maka tegangan yang terjadi adalah **tegangan tarik** (*tensile stresses*), sedangkan jika batang mengalami gaya aksial tekan maka tegangan yang terjadi adalah **tegangan tekan** (*compressive stresses*).tampang potongan

Jika tegangan σ bekerja pada arah tegak lurus terhadap tampang potongan, maka disebut **tegangan normal** (*normal stress*). Adapun jika tegangan bekerja sejajar dengan permukaan tampang potongan, disebut sebagai **tegangan geser** (*shear stress*).

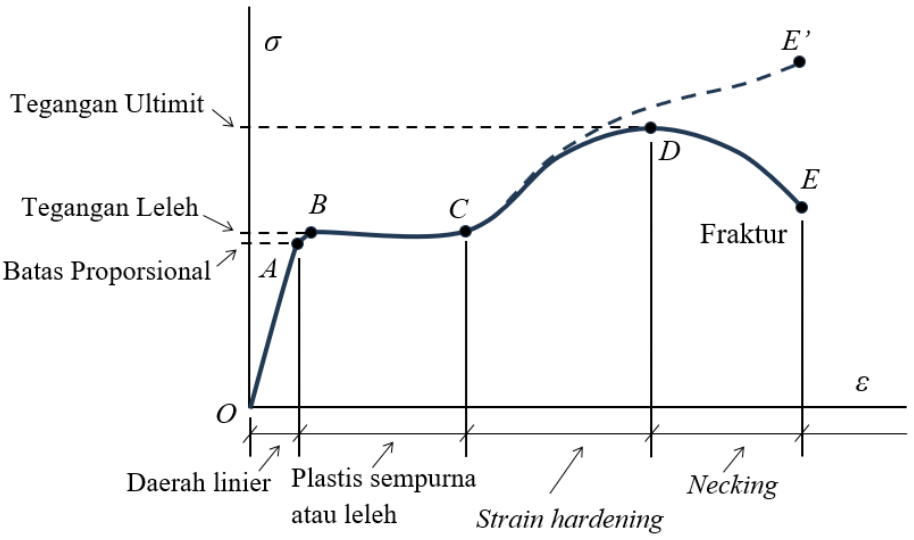
11.2 Diagram Tegangan- Regangan

Sifat- sifat mekanik material yang digunakan dalam bidang teknik ditentukan berdasarkan pengujian (*test*) yang dilakukan pada spesimen kecil material dengan alat uji tarik atau tekan (*universal testing machine*) di laboratorium. Material yang bersifat **liat/ daktail** (*ductile*) seperti baja, aluminium, dan sebagainya diuji

secara tarik, sedangkan material yang bersifat **getas** (*brittle*) seperti beton, bata dan sebagainya diuji secara tekan.

Hasil pengujian tarik atau tekan terhadap material dapat disajikan dalam bentuk diagram **tegangan- regangan** (*stress- strain diagram*), yang memberikan informasi penting tentang sifat- sifat mekanik dan perilakunya.

Pada Gambar 11.3 ditunjukkan diagram tegangan- regangan untuk material baja liat (*mild steel*) atau baja dengan kadar karbon rendah (*low-carbon steel*). Pada awal pembebanan yang dimulai dari titik *O*, diagram berupa garis lurus menuju *A* yang berarti tegangan dan regangan bersifat **sebanding** (*proportional*). Daerah antara titik *O* hingga titik *A* disebut daerah **linier**. Setelah titik *A* kondisi proporsional tidak terjadi lagi, sehingga tegangan di titik *A* disebut sebagai batas proporsional (*proportional limit*). Kem **itas** (*mo* juga dise lang ketil nasi perr (*non dim* ang sam elah bata tika sam ini mat ebut seba sini disebut **tegangan leleh** (*yield stress*). Ketika mencapai daerah *B* ke *C* ini material menjadi **plastis sempurna** (*perfectly plastic*), artinya batang ini bisa berdeformasi tanpa penambahan beban yang bekerja. Daerah antara titik *B* dan titik *C* disebut daerah **plastis**, karena deformasi yang terjadi bersifat permanen ketika beban dihilangkan.



Gambar 11.2 Diagram tegangan- regangan untuk baja struktur tipikal pada kondisi tarik (tidak diskala)

Perpanjangan spesimen baja lunak pada daerah plastis sempurna adalah sebesar 10 s/d 15 perpanjangan yang terjadi antara saat mulai pembebanan dan batas proporsional.

Setelah menjalani regangan yang besar setelah leleh pada daerah *BC*, baja mulai mengalami **pengerasan regangan** (*strain harden*). Selama pengerasan regangan, material mengalami perubahan di dalam struktur atom dan kristalin nya, yang menyebabkan peningkatan ketahanan material terhadap deformasi lanjutannya. Pertambahan panjang sekarang memerlukan peningkatan beban tarik, dan diagram tegangan– regangan mempunyai kemiringan positif dari *C* ke *D*. Akhirnya beban mencapai nilai maksimumnya, dan tegangan yang terjadi di titik *D* disebut **tegangan ultimit** (*ultimate stress*). Perpanjangan berikutnya pada batang sebenarnya disertai dengan reduksi beban, dan **fraktur** (*fracture*) akhirnya terjadi pada titik *E* pada Gambar 11.2

Kontraksi lateral pada spesimen terjadi ketika batang memanjang, yang menyebabkan terjadinya pengurangan luas tampang potongan. Pengurangan luas yang terjadi sangat kecil, sehingga

tidak nampak hingga titik *C*, tetapi setelah itu pengurangan yang terjadi mengubah bentuk diagramnya. **Tegangan sebenarnya** (*true stress*) yang terjadi lebih besar daripada **tegangan nominal** (*nominal stress*), karena dihitung dengan luas yang lebih kecil. Pada sekitar **tegangan ultimit** (*ultimate stress*), pengurangan luas yang terjadi menjadi jelas kelihatan, dan disebut *necking* (leher) pada batang. Jika luas penampang aktual pada bagian leher dipakai untuk menghitung tegangan, maka kurva tegangan-regangan yang sebenarnya akan mengikuti garis putus- putus *CE'* pada Gambar 11.2. Beban total yang dapat didukung oleh batang berkurang setelah tegangan ultimit tercapai (kurva *DE*), tetapi reduksi ini disebabkan oleh berkurangnya luas penampang batang, bukan oleh hilangnya kekuatan material. Kenyataannya material menahan pertambahan tegangan hingga putus (titik *E'*). Untuk keperluan praktis pada umumnya, kurva tegangan- regangan konvensional *OABCDE*, yang berdasarkan pada luas penampang asli dan mudah dihitung, memberikan informasi yang memuaskan untuk digunakan dalam desain.

Gambar 11.2 menunjukkan karakteristik umum kurva tegangan-regangan baja lunak, tetapi perbandingannya tidak realistis, karena regangan yang terjadi dari *B* ke *C* mungkin lebih dari 15 kali regangan yang terjadi dari *O* ke *A*.

Adanya titik leleh yang jelas diikuti dengan regangan plastis yang besar merupakan karakteristik penting baja lunak yang sering dimanfaatkan dalam desain praktis. Material yang mengalami regangan besar sebelum runtuh digolongkan dalam material liat/ daktail (*ductile*). Keuntungan adanya **daktilitas** (*ductility*) adalah distorsi yang terjadi akan kelihatan ketika beban meningkat, sehingga memberikan kesempatan untuk melakukan aksi perbaikan sebelum keruntuhan sebenarnya terjadi. Selain daripada itu material liat mempunyai kemampuan untuk menyerap

sejumlah besar energi sebelum runtuh. Ketika deformasi besar terjadi pada material daktail yang dibebani pada daerah plastis, maka material tersebut mengalami *plastic flow* (**aliran plastis**).

11.3 Hukum Hooke dan Rasio Poisson

Sebagian besar material struktur mempunyai daerah awal pada diagram tegangan- regangan dengan sifat elastis sekaligus linier, dan oleh karena itu disebut **elastik linier**. Perilaku ini sangat penting di bidang teknik karena banyak mesin dan struktur yang didesain untuk berfungsi pada tingkat tegangan rendah, agar tidak terjadi deformasi permanen akibat leleh atau **aliran plastis** (*plastic flow*).

Hubungan linier antara tegangan dan regangan pada suatu batang baja yang mengalami tarikan atau tekanan dapat di nyatakan dalam persamaan :

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{.....} \quad (11\text{-}3)$$

dengan E adalah modulus elastisitas material yang merupakan kemiringan diagram tegangan- regangan pada daerah elastik linier. Satuan E sama dengan satuan tegangan, mengingat regangan tidak mempunyai satuan.

Persamaan 11.3 umumnya dikenal sebagai **Hukum Hooke**, dari nama ilmuwan Inggris Robert Hooke (1635- 1703). Oleh Hooke inilah ditetapkan hubungan linier antara beban yang bekerja dan perpanjangan yang dihasilkan.

Ketika batang prismatis dibebani tarik, perpanjangan aksial diikuti oleh **kontraksi lateral** (tegak lurus terhadap arah bekerjanya beban). Regangan lateral pada titik di batang sebanding dengan regangan aksial pada titik yang sama, jika materialnya elastik linier.

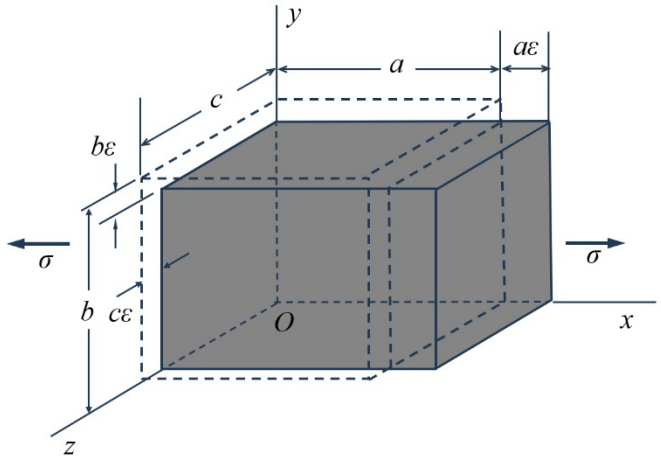
Rasio antara regangan arah lateral terhadap regangan arah aksial disebut sebagai **Rasio Poisson**, dan dinayatakan dengan huruf Yunani υ (nu), sehingga :

$$\upsilon = \frac{-\,regangan\,lateral}{regangan\,aksial} \qquad \text{..... (11-4)}$$

Pada batang tertarik, regangan lateral menunjukkan pengurangan lebar (regangan negatif) dan regangan aksial menyatakan perpanjangan (regangan positif). Pada batang tertekan terjadi kebalikannya, dengan batang menjadi pendek (regangan aksial negatif) dan lebih lebar (regangan lateral positif). Oleh karena itu rasio Poisson selalu mempunyai nilai positif untuk seluruh material.

11.4 Perubahan Volume

Karena dimensi batang dalam kondisi tarik atau tekan berubah ketika beban diterapkan, maka volume batang juga berubah. Perubahan volume dapat dihitung dari regangan- regangan aksial dan lateral.



Gambar 11.3 Perubahan bentuk suatu elemen pada batang tertarik

Pada Gambar11.3 ditinjau suatu elemen material isotropis yang dipotong dari batang tertarik. Bentuk asli elemen ditunjukkan dengan garis putus- putus berupa prisma dengan sisi- sisi *a, b*, dan *c* pada arah *x, y* dan *z*. Sumbu *x* diambil pada arah longitudinal batang, yang merupakan arah tegangan normal σ yang dihasilkan oleh gaya aksial. Bentuk akhir elemen ditunjukkan dengan garis tebal. Perpanjangan elemen pada arah beban adalah $a\varepsilon$, dengan ε adalah regangan aksial. Karena regangan lateral adalah $-\upsilon\varepsilon$ (persamaan 11-4), maka dimensi lateral berkurang sebesar $b\upsilon\varepsilon$ *dan* $c\upsilon\varepsilon$ pada arah *y* dan *z*. Dengan demikian dimensi final elemen adalah $a(1+\varepsilon)$, $b(1-\upsilon\varepsilon)$ dan $c(1-\upsilon\varepsilon)$, dan volume final adalah

$$V_f = abc(1+\varepsilon)¿\ \upsilon\varepsilon)(\ 1-¿\ \upsilon\varepsilon) \quad \text{..... (a)}$$

Jika persamaan ini diekspansikan, kita akan memperoleh suku-suku dalam kuadrat dan pangkat 3 dari ε. Karena nilai ε sendiri kecil dibandingkan 1, maka kuadrat dan pangkat 3 nya sangat kecil dibandingkan dengan ε sendiri dan dapat diabaikan dari persamaan. Oleh karena itu volume final elemen akan diperoleh :

$$V_f = abc(1+\varepsilon-2\,\upsilon\varepsilon)\ldots\ldots\ldots(b)$$

Dan perubahan volumenya adalah :

$$\Delta V = V_f - V_0 = abc\varepsilon(1-2\,\upsilon)$$

Dengan V_0 adalah volume asli *abc*. **Perubahan volume satuan** (*unit volume change*) e dinyatakan sebagai perubahan volume dibagi dengan volume asli, atau :

$$e = \frac{\Delta V}{V_0} = e(1-2\,\upsilon) = \frac{\sigma}{E}(1-2\,\upsilon) \quad \text{..... (11-5)}$$

Kuantitas e juga dikenal sebagai **dilatasi** (*dilatation*). Persamaan (11-5) dapat dipakai untuk menghitung perubahan volume batang

tarik, jika regangan tarik ε (atau tegangan tarik σ) diketahui. Persamaan ini juga dapat dipakai untuk tekan, yang dalam hal ini ε adalah regangan negatif, dan volume batang berkurang.

Dari persamaan (11-5) dapat dilihat, bahwa nilai maksimum υ yang mungkin terjadi untuk material biasa adalah 0.5, karena untuk nilai yang lebih besar akan berarti volume berkurang ketika material ditarik, yang secara fisik tidak mungkin terjadi.

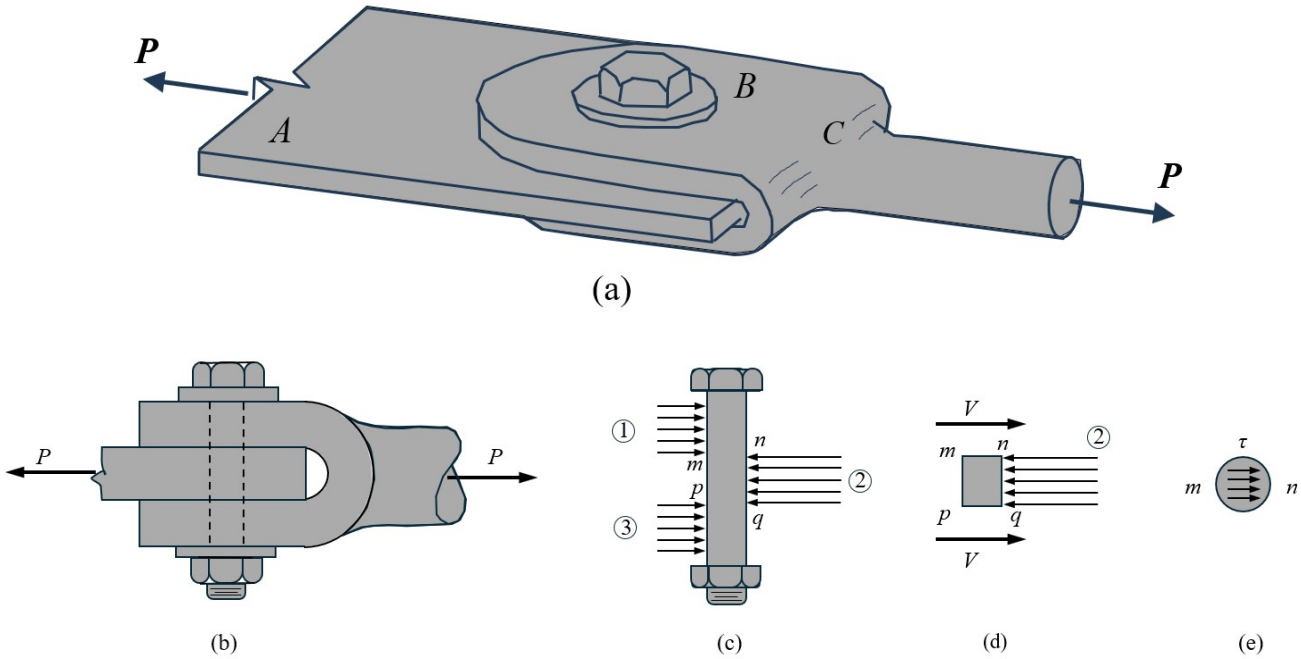
Untuk sebagian besar material nilai υ sekitar $\frac{1}{4}$ atau $\frac{1}{3}$ pada daerah elastis linier, yang berarti perubahan volume satuan berada pada rentang 0.3ε sampai 0.5ε. Untuk perilaku daerah plastis sempurna, tidak terjadi perubahan volume, sehingga rasio Poisson dapat diambil 0.5.

11.4 Tegangan dan Regangan Geser

Jika sebelumnya kita mengenal efek tegangan normal yang dihasilkan oleh gaya aksial yang bekerja pada batang, sekarang kita perhatikan tegangan geser yang bekerja paralel atau tangensial terhadap permukaan material.

Sambungan baut pada Gambar 11.4 terdiri atas pelat datar *A*, pengait (*clevis*) *C*, dan baut *B* yang menembus pengait *C* dan pelat *A*. Akibat beban tarik P, maka pelat *A* dan pengait *C* akan menekan baut dengan **tegangan dukung** (*bearing stress*), seperti nampak pada Gambar 11.4.b dan 11.4.c, sementara pada baut juga timbul tegangan yang melawannya. Selain daripada itu, pelat *A* dan pengait *C* akan memotong baut pada bidang *m-n* dan *p-q* dengan **tegangan geser** (*shear stresses*), seperti ditunjukkan pada **diagram benda bebas** (*free body diagram*) Gambar 11.4.d. Penampang potongan lingkaran baut *m-n* mengalami tegangan

geser, seperti ditunjukkan pada Gambar.11.4.e. Untuk tegangan geser digunakan huruf Yunani τ (tau).



Gambar 11.4 Sambungan baut dengan baut menahan tegangan dukung dan tegangan geser langsung

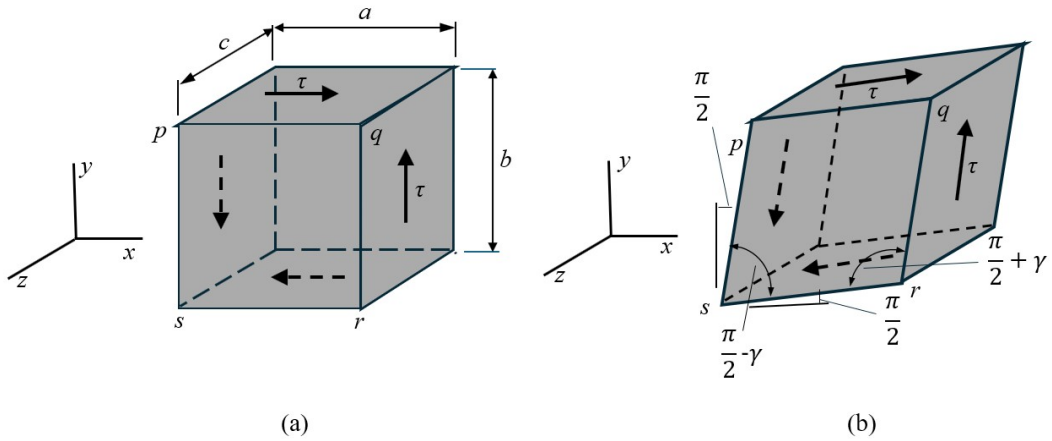
Pada diagram benda bebas Gambar 11.4.c nampak terdapat tendensi terjadinya gaya geser pada potongan penampang *m-n* dan *p-q*. Dalam hal ini gaya geser *V* akan memotong baut pada 2 potongan, sehingga baut disebut mengalami **geser ganda** (*double shear*).

Tegangan geser rata- rata pada potongan penampang baut dapat diperoleh dengan membagi gaya geser total *V* dengan luas penampang baut *A* sebagai :

$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{..... (11-6)}$$

Sambungan baut dengan beban P tarik seperti Gambar 11.4 merupakan contoh terjadinya **geser langsung** (*direct shear*) atau **geser sederhana** (*simple shear*). Dalam hal ini tegangan geser timbul oleh aksi langsung gaya- gaya yang memotong material baut.

Suatu elemen yang mengalami tegangan geser saja ditunjukkan pada Gambar 11.5.a, dan disebut **geser murni** (*pure shear*). Selanjutnya akibat aksi tegangan- tegangan geser ini maka material berdeformasi dan mengalami regangan geser (*shear strain*) seperti ditunjukkan pada Gambar 11.5.b. Sudut γ adalah



(a) (b)

Gambar 11.5 Tegangan dan regangan geser

Pembuatan diagram tegangan- regangan dalam geser (dalam τ versus γ) dapat dilakukan serupa dengan dengan diagram tarik (σ versus ε) pada material yang sama, meskipun berbeda besarannya.

Untuk banyak material, bagian awal dari diagram tegangan-regangan geser juga berupa garis lurus, sebagaimana pada batang tarik. Pada daerah elastik linier, tegangan geser dan regangan

geser berbanding lurus (proporsional), dan kita punya persamaan Hukum Hooke dalam geser :

$$\tau = G\gamma \quad \text{..... (11-7)}$$

Dalam hal ini G adalah modulus elastisitas geser (*shear modulus of elasticity*) atau modulus kekakuan (*modulus of rigidity*). Satuan G serupa dengan satuan E, misalnya dalam satuan SI digunakan pascal atau GPa.

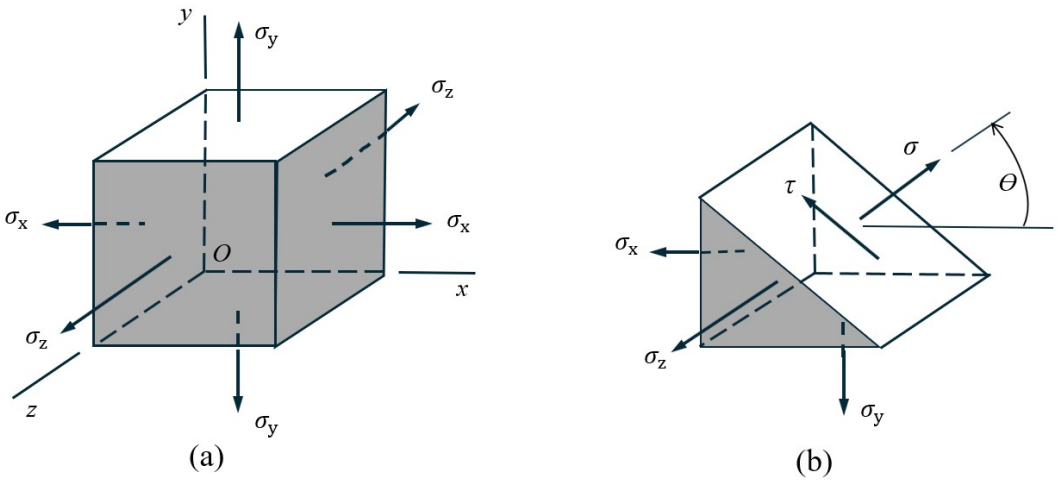
Modulus elastisitas dalam tarik dan geser (E dan G) dihubungkan dalam persamaan :

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \quad \text{..... (11-8)}$$

dengan υ adalah Rasio Poisson.

11.5 Tegangan Triaksial

Suatu elemen material yang dikenai tegangan- tegangan σ_x, σ_x, dan σ_z yang bekerja pada arah saling tegak lurus (Gambar 11.6) disebut pada keadaan **tegangan triaksial**.



Gambar 11.6 Elemen pada tegangan triaksial

Hubungan antara tegangan- tegangan normal dan regangan-regangan normal pada arah *x*, *y* dan *z* untuk tegangan triaksial dapat diperoleh untuk material yang mengikuti Hukum Hooke, sebagai berikut :

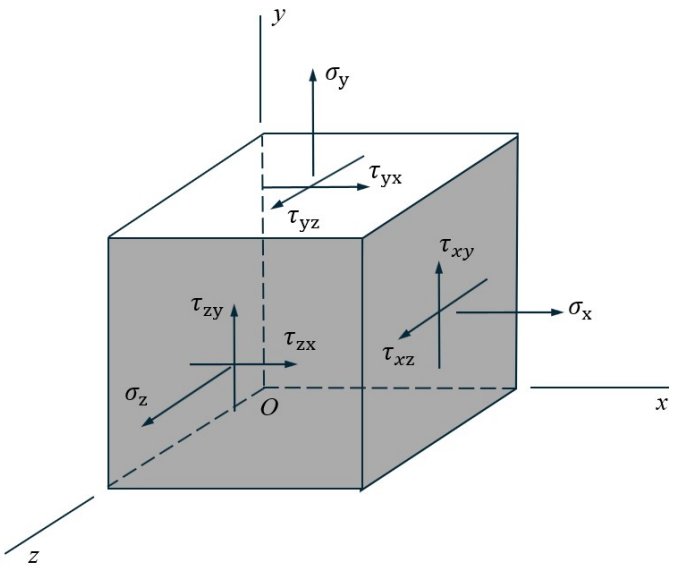
$$\varepsilon_x=\frac{\sigma_x}{E}-\frac{\nu}{E}(\sigma_y+\sigma_z)$$

$$\varepsilon_y=\frac{\sigma_y}{E}-\frac{\nu}{E}(\sigma_z+\sigma_x) \quad \text{.....} \qquad (11.9)$$

$$\varepsilon_z=\frac{\sigma_z}{E}-\frac{\nu}{E}(\sigma_x+\sigma_y)$$

11.5 Tegangan Tiga Dimensi

Pada kondisi umum tegangan tiga dimensi, suatu elemen tegangan akan mengalami tegangan- tegangan normal dan geser pada seluruh sisinya, seperti terlihat pada Gambar 11.7.



Gambar 11.7 Elemen yang dikenai tegangan tiga dimensi (hanya digambarkan tegangan pada sisi- sisi positif saja)

Hukum Hooke untuk tegangan tiga dimensi terdiri atas persamaan triaxial yang berhubungan dengan tegangan dan regangan normal, dan persamaan- persamaan yang berhubungan dengan tegangan

dan regangan. Persamaan- persamaan untuk tegangan tiga dimensi, dengan menyatakan regangan dalam hal tegangan, disajikan sebagai berikut ini.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_z + \sigma_x) \quad \text{.....} \quad (11.10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \qquad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \qquad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

Persamaan (11.9) sering disebut **Hukum Hooke Umum untuk Regangan**.

DAFTAR PUSTAKA

Gere, J. (2004). *Mechanics of Materials*, Belmont, AS: Brooks/ Cole-Thomson Learning Inc.

Beer, F.P, Johnston, E.R., & Dewolf, J.T. (2006). *Mechanics of Materials,* Boston, AS: Mc Graw Hill.

Boresi, A.P., Schmidt, R.J. dan Sidebottom, O.M. (1992). *Advanced Mechanics of Materials,* New York, AS: John Wiley & Sons, Inc.

da Silva, V.T. (2006). *Mechanics and Strength of Materials,* Berlin, Jerman: Springer.

Hearn, E.J. (1977). *Mechanics of Materials 1,* Oxford, Inggris: Butterworth Heinemann.

Timoshenko, S. (1948). *Strength of Materials Part I*. New York, AS: D. Van Nostrand Company, Inc.

Case, J., Chilver, L. & Ross, C.T.F., *Strength of Materials and Structures.*, London, Inggris: Arnold.

Muslikh lahir di Yogyakarta, 3 Agustus 1957. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Teknik Sipil pada tahun 1982 di Universitas Gadjah Mada, meraih gelar M.Sc. (1988), dan M.Phil. (1992), di Strathclyde University, Glasgow, Inggris. Gelar Doktor diperoleh dari Institut Teknologi Bandung (2005). Keanggotaan profesi yang diikuti adalah HAKI (Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia) dan PII (Persatuan Insinyur Indonesia). Penulis menjadi Pengurus HAKI DIY selama beberapa periode hingga sekarang, dengan berbagai kegiatan HAKI meliputi seminar, kursus singkat dan sertifikasi keahlian. Selain sebagai dosen profesional, yang membimbing skripsi mahasiswa S1, tesis mahasiswa S2 dan disertasi mahasiswa S3, penulis aktif melakukan penelitian di laboratorium dan menuliskannya dalam jurnal, juga berkiprah di kalangan profesional bidang teknik struktur. Setelah pensiun dari dosen bidang struktur di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada pada tahun 2022, kemudian menjadi dosen tidak tetap di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta sampai sekarang. Buku yang pernah ditulisnya bersama Tim Penulis adalah *Pemodelan Elemen Hingga Struktur menggunakan Abaqus* (2021).

Email Penulis: muslikh@umy.ac.id